干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于生态恢复的阿克苏河流域生态输水调度优化研究

聂 艳[1]， 郭永瑞[1]， 谭 盈[1,2]， 黄卫东[3]， 刘新华[3]

（1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室，湖北 武汉 430079；2. 中国城市规划设计研究院深圳分院，广东 深圳 518000；3. 新疆维吾尔自治区塔里木河流域阿克苏管理局，新疆 阿克苏 841000）

摘 要：生态输水调度是生态保护和恢复最有效的措施之一，实施生态输水对恢复干旱半干旱地区天然生态系统、维护绿洲生态系统健康具有重要意义。结合阿克苏河流域生态输水现状，在识别自然植被重点区和估算生态需水的基础上，建立了基于生态恢复目标的流域生态输水调度优化框架。首先采用高分系列影像识别自然植被信息，建立阿克苏河流域2015—2020年自然植被数据集，逐像元统计自然植被出现频次确定了艾希曼湖湿地区、第一师边缘胡杨林区、五团边缘胡杨林区3个自然植被重点区，面积达1257.69 km^2；借助面积定额法和水量平衡法估算3个自然植被重点区的生态输水量分别为1.53×10^8 m^3、2.73×10^8 m^3、1.14×10^8 m^3；确定了流域生态输水的最佳时间为5—9月，单次或2次进行生态输水，建议单次生态输水量大于0.2×10^8 m^3且输水天数大于10 d；渠系网络分析显示3个自然植被重点区设置的8个输水口可以作为今后生态输水路径的参考。研究结果对阿克苏河流域生态输水调度、生态用水精细管理等具有重要的指导价值。

关 键 词：生态输水；路径优化；生态恢复；阿克苏河流域

文章编号：

近年来学术界和工程界使用生态输水调度提法越来越多，但一直没有对其给出明确定义，主要体现在关于生态目标的选取以及优化调度目标的先后次序上[1-4]；大部分学者认为是将生态因素考虑到水库、湖泊调度和区域水资源配置中，旨在恢复受损的自然生态系统，促进生态系统自我修复能力而实施的各项工程调度措施的统称[5-8]。20世纪70年代，塔里木河道完全断流，下游地下水位显著下降，河道两岸的自然植被大面积退化并伴随较严重的土地荒漠化[9-11]。为拯救断流近30 a、濒于毁灭的“绿色走廊”，于2001年启动塔里木河流域生态输水工程，经过21次累计84.3×10^8 m^3的生态输水，塔河下游生态环境发生了巨大变化，地下水位呈明显上升，天然生态逐步恢复，生态环境明显改善[12-16]；邓铭江等学者也根据多年连续监测数据，对塔河下游生态调度策略与模式进行了探讨[1,5]；而对塔河上游、塔河源流生态输水影响和调度的研究非常有限。2017年阿克苏河被纳入塔里木河流域胡杨林重点保护区生态补水区，利用主汛期和灌溉间歇期，实施生态输水工程，4 a累计输水3.5018×10^8 m^3。其中4次向艾希曼湖区累计输水2.2285×10^8 m^3；2次向第一师边缘胡杨林区输水1.2733×10^8 m^3。生态输水后天然湖泊逐步恢复，自然植被明显好转[17-20]。但目前的生态输水并未完全覆盖流域内自然植被重点区域，生态输水闸口距离自然植被分布区较远，影响了输水效果。因此，本文在系统识别流域自然植被重点区和科学估算生态需水的基础上，借助输水网络分析建立阿克苏河流域基于生态恢复目标的生态输水调度优化框架，以期为下一步阿克苏河流域生态输水调度、生态输水响应和生态用水精细管理等提供参考借鉴。

1 研究区概况

阿克苏河流域位于新疆维吾尔自治区西部，地

收稿日期：2021-06-28； **修订日期**：2021-09-28

基金项目：国家自然科学基金(41401232)；塔里木河流域阿克苏管理局课题(TGJAKSJJG-2019KYXM0002)资助

作者简介：聂艳(1977-)，男，副教授，主要从事自然资源评价、土壤生态研究. E-mail: nieyan@ccnu.edu.cn

理位置介于40°08′~41°35′N,78°47′~82°43′E之间,流域内总面积约为5.3×10^4 km²。流域内由上游库玛拉克河和托什干河汇合后史称阿克苏河,阿克苏河与流域南侧由南至北流入的叶尔羌河、和田河于三河源汇合后注入塔里木河,是塔里木河最大的源流,年均径流量为78.2×10^8 m³;具有明显的大陆性季风气候,干燥少雨,典型的荒漠植被有胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、芦苇(*Phragmites australis*)等[17-20]。目前阿克苏河流域生态输水主要通过四条输水通道完成(图1)。其中,向艾希曼湖湿地进行生态输水的输水通道有三条,一是从西大桥分水枢纽配水经胜利渠、阿音柯干渠到6号闸、7号闸向艾希曼湖区的萨依力克湖补水,通过8号闸向艾希曼湖区的皇宫湖补水;二是通过胜利渠48分水闸向艾希曼湖区的一团海子湿地补水;三是从西大桥分水枢纽配水经老大河到第1分水闸经洋瓦力克渠到阿瓦提县3号闸向艾希曼湖补水。向第一师边缘胡杨林区进行生态输水的输水通道分布在塔南灌区,主要依托塔南二干渠完成。

2 数据与方法

2.1 数据来源

选取2015—2020年覆盖研究区植被生长期内少云、可见度高、覆盖全流域的高分1号影像,以及部分覆盖了胡杨林集中分布的高分2号影像,数据来源于中国卫星应用中心(http://www.cresda.com/CN/)。应用ENVI 5.3软件对原始遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、镶嵌和裁剪、图像融合等预处理。借助CART(Classification and regression tree)决策树监督分类来提取自然植被信息,选择验证样本区进行精度评价,Kappa系数均在0.83以上,识别精度较高[21-23]。

2.2 研究方法

2.2.1 面积定额法 自然植被的生态需水量通过面积定额法计算[20,24],公式如下:

$$W=\sum_{i=1}^{n}w_i=\sum_{i=1}^{n}A_i\times r_i \tag{1}$$

式中:W为自然植被生态需水总量(m³);w_i为植被类型i的生态需水量(m³);A_i为植被类型i的面积(hm²);r_i为植被类型i的生态需水定额(m³·hm⁻²)。参考《阿克苏河流域管理志》,确定艾希曼湖湿地区和第一师边缘胡杨林区的林地灌溉定额为5500 m³·hm⁻²,灌木/草地的灌溉定额为4750 m³·hm⁻²;五团边缘胡杨林区和流域下游胡杨林区的林地灌溉定额为6150 m³·hm⁻²,灌木/草地的灌溉定额为5250 m³·hm⁻²。

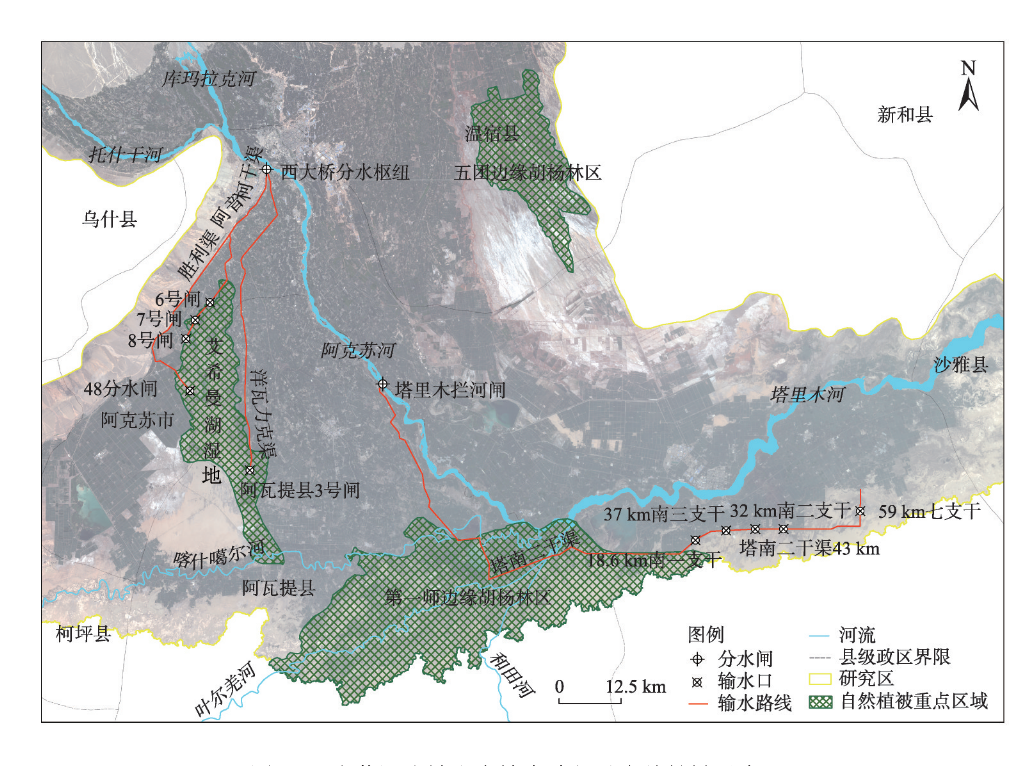


图1 阿克苏河流域生态输水路径及自然植被重点区

Fig. 1 Sketch map of ecological water conveyance route and key natural vegetation regions in Aksu River Basin

2.2.2 水量平衡法 艾希曼湖为干旱区内陆湖泊，湖泊生态需水量主要为入湖水量，即水面蒸发耗水量、湖泊渗漏量与降水补给量之差。采用水量平衡法计算湖泊生态需水量[20,25]，公式如下：

$$W=\sum_{j=1}^{n}W_j=(E_{20j}+Q_j-P_j)\times S \qquad (2)$$

式中：W为湖泊总生态需水量(m^3)；W_j为各月湖泊生态需水量(m^3)；E_{20j}为第j月20 m^2蒸发池水面蒸发量(mm)；Q_j为第j月湖泊渗漏水量，渗漏量为0.01 $mm\cdot d^{-1}$；P_j为第j月平均降水量(mm)；S为湖泊面积(hm^2)。

3　流域生态输水调度优化研究

3.1　自然植被重点区的识别

为获取流域内集中连片的自然植被重点分布区域，以借助CART建立的阿克苏河流域自然植被数据集为基础，逐像元统计2015—2020年阿克苏河流域自然植被（胡杨和灌木为主）的分布频次和面积（表1），2015—2020年自然植被分布频次为1~6次，数值越大，表示自然植被出现的频次越高，植被生长越稳定。

流域内胡杨等自然植被重点区主要分布在东北方向的五团边缘胡杨林区、艾希曼湖湿地区、第一师边缘胡杨林区3个区域（图1），自然植被除了胡杨外，多以芦苇、柽柳、骆驼刺、梭梭、罗布麻等灌木为主。从空间分布频次看，自然植被的分布频次由中间向四周递减，中心区域的分布频次可达到4~6次，胡杨等生长相对稳定；边缘分布频次低至1~2次，自然植被生长易遭到人为破坏。第一师边缘胡杨林区的胡杨林生长最稳定，胡杨分布频次高达5~6次的面积占比最大。阿克苏河沿线两侧也广泛分布着胡杨等自然植被，且分布频次较高，有些地方达5~6次，胡杨等自然植被生长稳定。

3.2　生态需水量的估算

本文将流域内3个自然植被重点区域作为流域植被修复的主要区域，自然植被和天然湖泊是流域生态系统内主要的生物因子和非生物因子，因此，以修复流域内自然植被重点区域内的自然植被和天然湖泊作为生态输水修复目标。

3.2.1 自然植被生态需水量 以恢复和维持自然植被群落生态结构和生态功能的稳定性作为自然植被恢复的出发点，以2015—2020年阿克苏河流域3个重点区域内自然植被分布频次≥2的范围作为恢复目标下的面积，计算生态恢复目标下自然植被的生态需水量。通过面积定额法计算获取3个自然植被重点区域2020年自然植被的生态需水量，再结合流域灌溉水利用系数(0.55)得到艾希曼湖湿地区、第一师边缘胡杨林区、五团边缘胡杨林区3个自然植被重点区的实际生态需水量分别为$0.86\times10^8\ m^3$、$2.73\times10^8\ m^3$、$1.14\times10^8\ m^3$，合计约$4.73\times10^8\ m^3$。

3.2.2 天然湖泊生态需水量 尽管近几年来艾希曼湖天然水面面积逐年扩大，但相对20世纪90年代，天然水面面积萎缩较为严重，尤其是西部和南部一团海子、二团海子及东南部水域明显缩小；如果仅以2015—2020年艾希曼湖的水面变化来考虑天然湖泊恢复目标所需的生态需水量，难以满足艾希曼湖水面持续恢复的需求。因此，结合前期研究成果，以1996年艾希曼湖水面面积(61.57 km^2)作为天然湖泊的恢复目标，采用水量平衡法计算艾希曼湖湿地天然湖泊的生态需水量。统计艾希曼湖湿地近50 a的年气象数据，参考前期研究成果[20]，计算得到艾希曼湖湿地自然湖泊单位面积生态需水量为10809 $m^3\cdot hm^{-2}$，即艾希曼湖湿地自然湖泊达到恢复目标所需的年生态需水量为$0.67\times10^8\ m^3$。

3.3　生态输水时间的确定

生态输水时间的确定，一方面需要考虑自然植被对生态用水的需求，另一方面是水资源实际情况对生态用水的限制，流域总水量的季节变化和绿洲农业用水量的季节差异直接影响流域内生态用水

表1　重点区域内自然植被频次分布面积统计

Tab. 1　Area of natural vegetation frequency distribution area in key regions　/km^2

重点区域	面积						合计
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	
艾希曼湖湿地	79.32	37.32	20.57	12.61	7.89	3.88	161.59
第一师边缘胡杨林区	253.92	163.01	129.87	107.42	81.31	36.73	772.26
五团边缘胡杨林区	77.35	73.93	62.81	49.02	34.61	26.12	323.84
合计	410.59	274.26	213.25	169.05	123.81	66.73	1257.69

量的季节差异。流域内主要的地表水来源为阿克苏河，根据《阿克苏河流域志》统计阿克苏河上游2个出山口水文站的多年月径流量，以2021年流域内阿克苏河为主要引水源的各个灌区计划用水量为例（表2），估算阿克苏河生态用水量的季节变化。在保障流域内作物灌溉需求的情况下，10月—次年4月，流域内生态用水量都不足2×10^8 m^3，生态输水时间在5—9月的存量充足，7月和8月的生态用水存量最多。

表2　阿克苏河流域月生态用水量分配

Tab. 2　Monthly distribution of ecological water consumption in Aksu River Basin　/10^8 m^3

月份	径流量	灌区计划用水	生态用水量
1	1.70	1.96	0.00
2	1.00	2.48	0.00
3	1.12	2.28	0.00
4	2.58	2.26	0.32
5	6.26	2.08	4.18
6	11.98	5.47	6.51
7	20.86	7.44	13.42
8	20.58	5.22	15.36
9	8.32	2.20	6.12
10	3.37	1.48	1.89
11	2.03	2.92	0.00
12	1.73	0.59	1.14

结合流域GF-1影像获取的自然植被年内NDVI时序变化发现流域自然植被从6月开始进入快速生长期，直到10月开始落叶；再对比流域的4次生态输水，发现2020年6月实施的9 d 0.12×10^8 m^{3}的小流量、短时间生态输水后自然植被的NDVI无明显变化，而其他时间实施生态输水后的当月或滞后1个月左右，自然植被的NDVI呈现明显上升趋势。因此，阿克苏河流域实施生态输水的时间建议在5—9月对自然植被的生长补给最合适。

目前阿克苏河流域生态输水工作一年进行1~2次，一年内进行单次生态输水工作安排在7—8月对水资源的利用效率最高，自然植被生长对水资源补给的需求也大；一年内进行2次生态输水的工作安排则可以在自然植被进入快速生长期之前，即5—6月增加一次输水工作，结合流域自然植被与生态输水的响应关系，建议单次输水量应多于0.2×10^8 m^3、输水天数多于10 d以保证生态输水的效果，7—8月再进行第2次生态输水。

3.4　生态输水路径的优化

当前阿克苏河流域的生态输水，没有覆盖东北方向的五团边缘胡杨林区，对第一师边缘胡杨林区的生态输水沿塔南二干渠穿过胡杨林区，但开设的生态输水口却在第一师边缘胡杨林区的东部，离自然植被主要分布区较远，生态输水过程中由于生态水的下渗和向周围水平的扩散并伴随着蒸发、蒸腾的消耗，生态输水效果减弱。为科学合理确定流域生态输水途径，本文针对艾希曼湖湿地、第一师边缘胡杨林区和五团边缘胡杨林区3个自然植被重点区，结合流域现状渠系网络和地形坡度，构建流域生态输水网络数据集，通过最小距离成本求解并提取生态输水起点至终点的最短路径；由于阿克苏河流域采取面状生态输水的方式，输水闸口应该设置在区域内的高处，以提高生态输水的效率。

基于30 m空间分辨率的全球数字高程模型ASTER GDEM提取流域及3个自然植被重点区的高程分布特征（图2）。阿克苏河流域内西北高、东南低，其中，艾希曼湖湿地北部、东部高，南部、西部低，适宜在湿地的北部、东部选取输水闸口；第一师边缘胡杨林区西高东低，适宜在区域的西部选取输水闸口；五团边缘胡杨林区北高南低，适宜在区域的北部选取输水闸口。各区域选取2~3个海拔较高的输水闸口，作为网路分析的目标停靠点。

流域内的引水枢纽/拦河闸作为渠系网络分析的起点（图2），主要包括联合渠首、西大桥引水枢纽、协合拉引水枢纽、柯柯牙尔龙口、台兰河龙口、五团龙口、塔里木拦河闸等，其中，联合渠首、西大桥引水枢纽、协合拉引水枢纽和塔里木拦河闸等从阿克苏河引水，柯柯牙尔龙口、台兰河龙口、五团龙口分别从柯柯牙河、台兰河、喀拉玉尔衮河引水。

确定目标停靠点和输水起点，基于阿克苏河流域的现有渠系分布，应用ArcMap 10.2软件Network Analyst功能模块进行网络分析[26]，计算由引水枢纽/拦河闸到各个目标停靠点，即生态输水闸口的最短路径，形成阿克苏河流域生态输水最优参考路径（图3）。

从图3可以看出，通过西大桥引水枢纽和塔里木拦河闸引阿克苏河水至艾希曼湖湿地、第一师边缘胡杨林区和流域下游胡杨林区，输水期间的流量可以满足2个区域的生态用水；通过五团龙口引喀

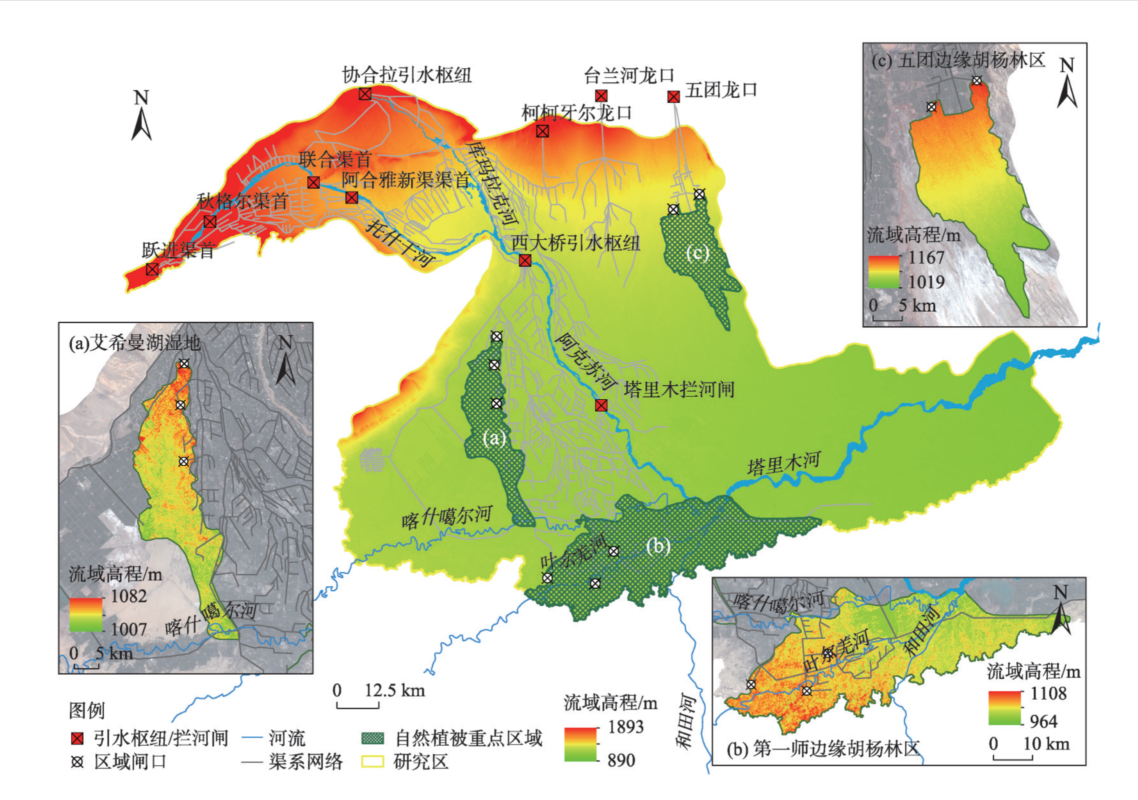


图2 阿克苏河流域生态输水的引水枢纽和输水闸口示意图

Fig. 2 Sketch map of water diversion project and water gate of ecological water conveyance in Aksu River Basin

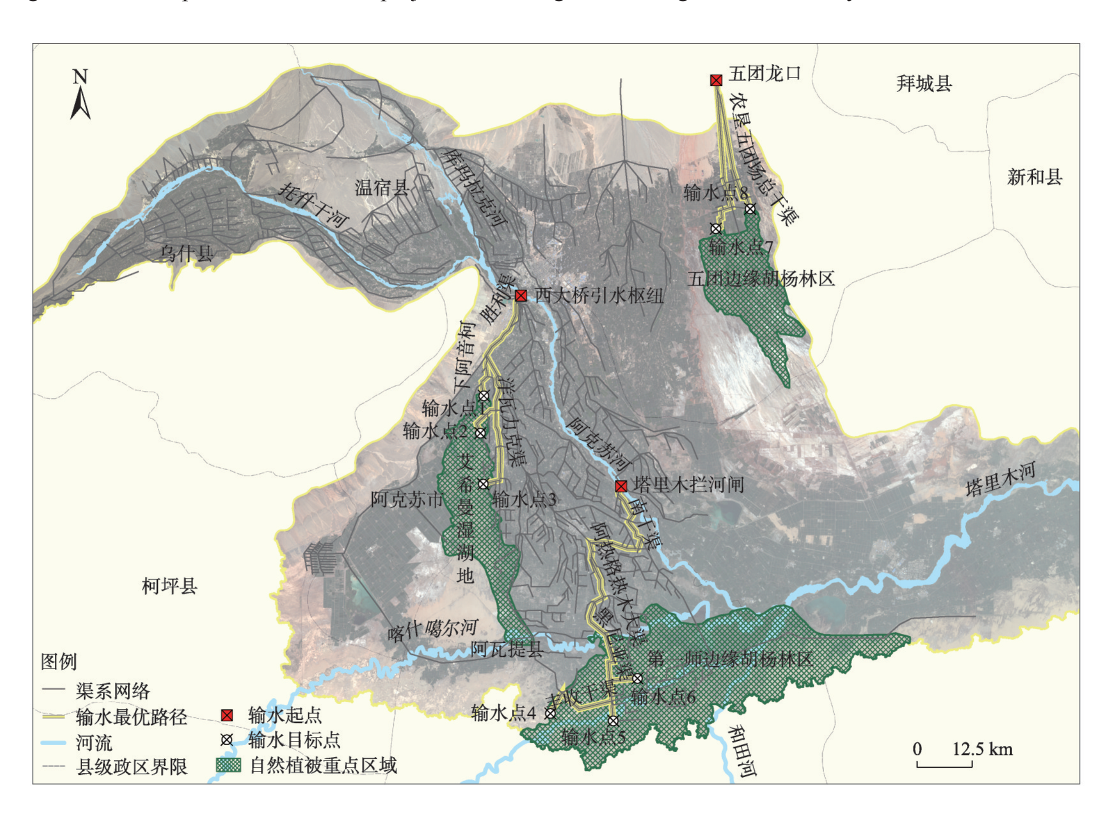


图3 阿克苏河流域生态输水最优路径示意图

Fig. 3 Sketch map of optimal path of ecological water conveyance in Aksu River Basin

拉玉尔衮河水至五团边缘胡杨林区，喀拉玉尔衮河多年平均径流量为$2.2\times10^{8}\ m^{3}$，可以满足五团边缘胡杨林区的生态用水。上述模拟得到的生态输水路径可以作为今后流域生态输水工程的参考(表3)。

表3　阿克苏河流域生态输水路径优化方案

Tab. 3　Optimization of ecological water conveyance path of Aksu River Basin

输水起点	输水口	路径长度/km	输水区域	输水量/10^8 m^3
西大桥引水枢纽	输水点1	25.81	艾希曼湖湿地	1.53
	输水点2	37.13		
	输水点3	48.67		
塔里木拦河闸	输水点4	87.99	第一师边缘胡杨林区	2.73
	输水点5	73.00		
	输水点6	70.85		
五团龙口	输水点7	36.88	五团边缘胡杨林区	1.14
	输水点8	30.90		

4　结　论

（1）根据自然植被的空间频度图确定了3个自然植被重点区，以恢复自然植被的群落稳定性、满足天然湖泊水面扩大需求作为出发点，估算得到艾希曼湖湿地、第一师边缘胡杨林区、五团边缘胡杨林区的生态需水量分别为1.53×10^8 m^3、2.73×10^8 m^3、1.14×10^8 m^3。

（2）结合流域生态用水存量的分配和自然植被生长对水资源需求的变化特征，建议流域实施生态输水的时间在5—9月比较适宜，一年内可进行单次或2次生态输水，为确保生态输水效果，单次输水应需达到一定的输水量和输水天数。

（3）基于阿克苏河流域的引水枢纽和渠系网络，建立了阿克苏河流域输水网络数据集，将筛选确定的输水闸口作为生态输水的目标停靠点，借助GIS网络分析识别了流域3个自然植被重点区的生态输水最优路径，第一师边缘胡杨林区的生态输水距离最远，超过70 km。

参考文献（References）

[1] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(8): 864-876. [Deng Mingjiang, Zhou Haiying, Xu Hailiang, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance[J]. Scientia Sinica Techologica, 2016, 46(8): 864-876.]

[2] Richard M V, Sieber J, Archfield S A, et al. Relations among storage, yield and instream flow[J]. Water Resources Research, 2007, 43(5): 909-918.

[3] Pang A, Sun T, Yang Z. Economic compensation standard for irrigation processes to safeguard environmental flows in the Yellow River estuary, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 482: 129-138.

[4] 陈偲, 张代青, 于国荣, 等. 水库生态调度研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 99-102. [Chen Si, Zhang Daiqing, Yu Guorong, et al. Review of research on ecological operation of reservoir[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(11): 99-102.]

[5] 邓铭江, 黄强, 畅建霞, 等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 757-773. [Deng Mingjiang, Huang Qiang, Chang Jianxia, et al. Large-scale ecological operation research and practice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 757-773.]

[6] 邓铭江, 黄强, 张岩, 等. 额尔齐斯河水库群多尺度耦合的生态调度研究[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1387-1398. [Deng Mingjiang, Huang Qiang, Zhang Yan, et al. Study on ecological scheduling of multi-scale coupling of reservoir group[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1387-1398.]

[7] 王道席, 张婕, 杜得彦. 黑河生态水量调度实践[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 96-99. [Wang Daoxi, Zhang Jie, Du Deyan. Practice of ecology-oriented water dispatching in the Heihe River Basin[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 96-99.]

[8] 邓铭江, 石泉. 内陆干旱区水资源管理调控模式[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1046- 1054. [Deng Mingjiang, Shi Quan. Management and regulation pattern of water resource in inland arid regions [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9): 1046-1054.]

[9] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2418-2426. [Fu Aihong, Chen Yaning, Li Weihong. Assessment on ecosystem health in the Tarim River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2418-2426.]

[10] 崔旺诚, 李卫红, 徐海量. 塔里木河下游输水与生态保育[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 172-178. [Cui Wangcheng, Li Weihong, Xu Hailiang. Research on the response scope of natural vegetation in the lower reaches of Tarim River after water transport[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(2): 172-178.]

[11] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 415-424. [Sun Tianyao, Li Xuemei, Xu Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. Ar-

id Land Geography, 2020, 43(2): 415-424.]

[12] 高庆, 艾里西尔·库尔班, 肖昊. 塔里木河下游区域植被时空变化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 624-632. [Gao Qing, Kuerban Ailixier, Xiao Hao. Spatiotemporal variation of vegetation in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 624-632.]

[13] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 苏里坦, 等. 塔里木河下游河岸带地下水埋深对生态输水的响应过程[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 979-986. [Liu Qianqian, Hanati Gulimire, Su Litan, et al. Response process of groundwater table to ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River riparian zone[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 979-986.]

[14] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247.]

[15] 韩路, 王海珍, 牛建龙, 等. 荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水位梯度的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6836-6846. [Han Lu, Wang Haizhen, Niu Jianlong, et al. Response of *Populus euphratica* communities in a desert riparian forest to the groundwater level gradient in the Tarim Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (20): 6836-6846.]

[16] 雍正, 赵成义, 施枫芝, 等. 近20年塔里木河干流区地下水埋深变化特征及其生态效应研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 182-189. [Yong Zheng, Zhao Chengyi, Shi Fengzhi, et al. Variation characteristics of groundwater depth and its ecological effects in the main stream of the Tarim River in the past 20 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 182-189.]

[17] 王志成, 蒋军新, 方功焕, 等. 水资源约束下的阿克苏河流域适宜绿洲规模分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 986-992. [Wang Zhicheng, Jiang Junxin, Fang Gonghuan, et al. Analysis on the suitable scale of the Aksu Oasis under the limit of water resources [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 986-992.]

[18] 李虹彬, 刘亚婷, 王卫光, 等. 气候因素对阿克苏河径流变化影响的定量评估[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 115-122. [Li Hongbin, Liu Yating, Wang Weiguang, et al. Assessing the impact of meteorological factors on streamflow in Aksu River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 115-122.]

[19] 聂艳, 马泽玥, 周逍峰, 等. 阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5138-5148. [Nie Yan, Ma Zeyue, Zhou Xiaofeng, et al. Soil moisture retrieval and monitoring in the Aksu River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5138-5148.]

[20] 汪瑞. 阿克苏河灌区植被及湖泊生态需水量估算与特征分析研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2020. [Wang Rui. Estimation and characteristic analysis of vegetation and lake ecological water demand in Aksu River irrigation district[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2020.]

[21] Sang X, Guo Q Z, Wu X X. Intensity and stationarity analysis of land use change based on CART algorithm[J]. Scientific Reports, 2019, 9(2): 570-574.

[22] 刘兆彬. 基于CART决策树的高分遥感影像建筑物提取研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018. [Liu Zhaobin. High-resolution remote sensing image building extraction based on CART decision [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018.]

[23] 刘欣. 利用CART算法从LandSat8卫星影像提取居民地的研究——以张掖、临泽地区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Liu Xin. Using CART algorithm extract residential from LandSat 8 images: Zhangye, Linze case study[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]

[24] 陈敏建, 王浩, 王芳, 等. 内陆河干旱区生态需水分析[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2136-2142. [Chen Minjian, Wang Hao, Wang Fang, et al. Ecological water demand analysis in arid region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2136-2142.]

[25] 白元, 徐海量, 张青青, 等. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 630-640. [Bai Yuan, Xu Hailiang, Zhang Qingqing, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630-640.]

[26] 李磊, 陆林, 孙小龙, 等. 高铁沿线旅游流网络结构及其互动关系研究: 以合福高铁沿线地区为例[J]. 人文地理, 2020, 35(1): 132-140. [Li Lei, Lu Lin, Sun Xiaolong, et al. Study on the network structure and interactive relationship of tourism flow along high-speed railway: An example of Hefei-Fuzhou high-speed railway[J]. Human Geography, 2020, 35(1): 132-140.]

Operation optimization of ecological water conveyance in Aksu River Basin based on ecological restoration

NIE Yan[1], GUO Yongrui[1], TAN Ying[1,2], HUANG Weidong[3], LIU Xinhua[3]

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation, Central China Normal University, Wuhan 430079, Hubei, China; 2. Shenzhen Branch of China Academy of Urban Planning and Design Institute, Shenzhen 518000, Guangdong, China; 3. Aksu Administration Bureau of Tarim River Basin of Xinjiang, Aksu 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Ecological operation is one of the most effective measures for ecological restoration and protection. Natural vegetation or lake is an essential part of the terrestrial ecosystem, and ecological water demand is an important foundation for the health of oasis ecosystems in arid and semi-arid regions. Therefore, it is essential to conduct ecological water conveyance projects to recover and maintain ecosystem health. In this study, combined with the current situation of ecological water conveyance in the Aksu River Basin, southern Xinjiang, China, the optimization framework of ecological water conveyance in the Aksu River Basin was established by identifying the key natural vegetation regions and estimating ecological water demand. First, the GF−1 image was used to identify the natural vegetation information, and the natural vegetation dataset of the Aksu River Basin from 2015 to 2020 was established. The occurrence frequency was counted pixel by pixel, and three key natural vegetation regions were obtained. They are Eichmann Lake Wetland, *Populus euphratica* forest region on the edge of the first division, and the *Populus euphratica* forest region on the edge of Wutuan. The total area reaches 1257.69 km^2. The area quota method and water balance method were used to estimate the amount of ecological water demand. The results show that the ecological water demand of the three key natural vegetation regions is 1.53×10^8 m^3, 2.73×10^8 m^3, and 1.14×10^8 m^3, respectively. Based on the monthly distribution of ecological water stock in the basin and the seasonal changes in water demand for natural vegetation growth, the best time for ecological water conveyance is from May to September. The single or two water conveyance jobs can be conducted in a year, suggesting that the single ecological water conveyance volume should be more than 0.2×10^8 m^3. Additionally, the water conveyance days should be more than ten days. The analysis of the canal network suggests setting up a new ecological water conveyance path with eight ecological water gates of three key natural vegetation regions. This research can provide the basis for the rational allocation of water resources in the Aksu River Basin. It can also provide a valuable reference for restoring and reconstructing surrounding vegetation in the Aksu River Basin.

Key words: ecological water conveyance; operation optimization; ecological restoration; Aksu River Basin